УДК 539.3:534.1 DOI: 10.12737/3516

Конечно-элементное моделирование пьезоэлектрического устройства накопления энергии на основе кантеливера*

А. Н. Соловьёв, Ле Ван Зыонг

Рассматривается моделирование пьезоэлектрического генератора, который является элементом устройства накопления энергии. Пьезоэлектрический генератор представляет собой консольно-закреплённую пластину, на которую наклеены пьезоэлектрические элементы и присоединена инерционная масса. Исследуются два варианта возбуждения колебаний пластины. В первом — закреплённая сторона совершает вертикальные гармонические колебания на заданной частоте и с заданной амплитудой, во втором к этой стороне приложена сила, изменяющаяся по гармоническому закону. В качестве математической модели устройства рассматривается трёхмерная краевая задача линейной теории электроупругости для составного упругого и пьзоэлектрического тела. Решение краевой задачи проводится методом конечных элементов в пакете ANSYS. При численном решении в качестве пьезоэлектрического материала взята пьезокерамика ПКР-7М, а в качестве материала пластины рассмотрены стеклопластик, дюраль, сталь. В качестве материала инерционной массы используется алюминий. Численно исследованы два случая колебания на резонансной частоте и колебания в низкочастотной области на частоте значительно меньшей частоты первого резонанса. Проведено исследование зависимости резонансной частоты устройства от толщины пластины для различных материалов и от величины массы инерционного элемента. Результаты представлены в виде графиков, позволяющих найти резонансную частоту для определённых размеров. Исследованы зависимости выходного потенциала на свободных электродах пьезоэлементов на резонансных частотах и в низкочастотной области от этих же параметров, эти результаты представлены также в виде графиков, что позволяет конструктору выбрать рациональные размеры элементов и сочетание материалов для достижения наибольшей эффективности устройства.

Ключевые слова: *МКЭ, накопление энергии, пьезоэлектрик, оптимизация, кантилевера.*

Введение. Современная малогабаритная бытовая техника, телефоны сотовой связи, беспроводные сенсорные системы для наблюдения и диагностики технического состояния различных объектов и т. п., потребляют весьма незначительную энергию. Для питания такого рода устройств широко применяются автономные источники электрической энергии, которые в ряде случаев могут быть заменены пьезоэлектрическими преобразователями энергии совершающими механических колебания.

По сравнению с другими методами накопления энергии, такими как электромагнитные [4] и электростатические [5], пьезоэлектрические накопители энергии на базе преобразования колебаний окружающей среды привлекают большое внимание в последнее время из-за их простой структуры, прямого преобразования энергии колебаний в электрическую энергию с высоким уровнем напряжения [6, 7].

Наиболее известны пьезоэлектрические преобразователи энергии двух конфигураций: осевого и кантилеверного типа. Они используются как для создания пьезогенераторов электрической энергии, входящих в состав автономных источников питания, так и для высокоточных линейных двигателей или пьезоэлектрических актюаторов. Пьезоэлектрическое устройство накопления энергии кантилеверного типа работает эффективнее, когда частота возбуждения находится в непосредственной близости от основной резонансной частоты электромеханической системы.

Некоторые упрощенные аналитические модели для пьезоэлектрического накопителя энергии кантилеверного типа представлены в литературе. Например, в [8] разработана аналитическая модель с распределёнными параметрами. Вычисление энергии пьезоэлектрических структур при-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-01-00196-а, 13-01-00943-а).

ведено в [9]. Sodano и др. использовали метод Релея — Ритца и разложения по собственным формам колебаний для описания устройства накопления энергии [10]. Erturk и Inman в [11] построили для одномерной модели устройства накопления энергии решение в аналитической форме. Liao и Sodano [10, 12] модифицировали модель Sodano, чтобы иметь возможность эффективно изучать системы накопления энергии и определять их оптимальные параметры.

В настоящей работе изучено влияние размеров и условия закрепления устройства накопления энергии при возбуждении колебаний на резонансной частоте или вблизи резонансной частоты, а также в низкочастотной области вдали от резонансных частот. Решение проблемы основано на конечно-элементном моделировании в пакете ANSYS.

На рис. 1 представлено устройство накопления энергии с использованием биморфной конфигурации. Структура кантилеверного типа пьезоэлектрического устройства накопления энергии, состоит из металлической пластины (подложки) 2, консольно закреплённой на основании 4, с двумя приклеенными пьезоэлементами 1 в зоне максимальных механических напряжений, возникающих при изгибе. С целью повышения коэффициента преобразования за счёт снижения резонансной частоты на верхней поверхности подложки может быть дополнительно размещен инерционный элемент 3. Устройства накопления энергии с консольно-закреплёнными изгибными элементами спроектированы для преобразования внешней энергии окружающей системы в низкочастотном диапазоне.

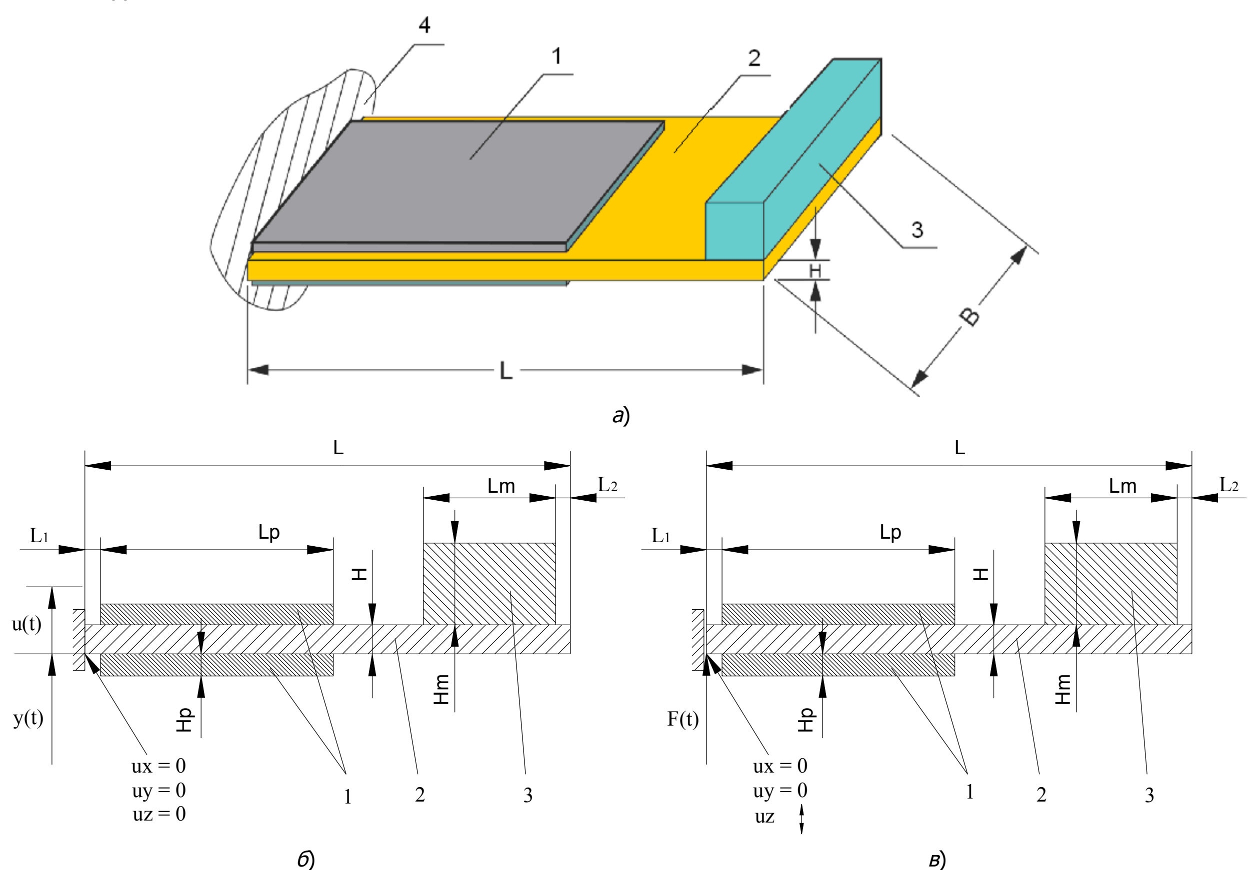


Рис. 1. Структура пьезоэлектрического устройства накопления энергии на основе кантеливера: *а* — общая структура, *б* — первая модель, *в* — вторая модель. 1 — пьезоэлемент; 2 — подложка; 3 — элемент инерционный; 4 — основание

При анализе собственных колебаний пьезоэлектрического устройства накопления энергии предполагается выполнение следующих электрических и механических граничных условий. Плоские поверхности пьезопластин покрыты тонкими электродами, представляющими собой эквипо-

тенциальные поверхности. Вся внешняя поверхность пьезопреобразователя свободна от механических напряжений.

1. Континуальные постановки задач электроупругости. Рассмотрим некоторый пьезопреобразователь Ω, представленный набором областей $\Omega_j = \Omega_{pk}$; $k = 1, 2, \ldots, N_p$; $j = k$ со свойствами пьезоэлектрических материалов и набором областей $\Omega_j = \Omega_{em}$; $m = 1, 2, \ldots, N_e$; $j = N_p + m$ со свойствами упругих материалов. Будем считать, что физико-механические процессы, происходящие в средах Ω_{pk} и Ω_{em}, можно адекватно описать в рамках теорий пьезоэлектричества (электроупругости) и упругости.

Для пьезоэлектрических сред $\Omega_j = \Omega_{pk}$ предположим, что выполняются следующие полевые уравнения и определяющие соотношения [13]:

$$\rho_{pk}\ddot{\mathbf{u}} + \alpha_{dj}\rho_j\dot{\mathbf{u}} - \nabla\cdot\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{f}_j\,;\nabla\cdot\mathbf{D} = 0\,, \tag{1}$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{c}_j^E\cdot\left(\boldsymbol{\varepsilon} + \beta_{dj}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}\right) - \mathbf{e}_j^T\cdot\mathbf{E}\,;\ \mathbf{D} + \varsigma_d\dot{\mathbf{D}} = \mathbf{e}_j\cdot\left(\boldsymbol{\varepsilon} + \varsigma_d\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}\right) + \boldsymbol{\text{э}}_j^S\cdot\mathbf{E}\,, \tag{2}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \left(\nabla\mathbf{u} + \nabla\mathbf{u}^T\right)\big/2\,;\ \mathbf{E} = -\nabla\varphi\,, \tag{3}$$

где $\rho(x)$ — плотность материала; $\mathbf{u}(x,t)$ — вектор-функция перемещений; $\boldsymbol{\sigma}$ — тензор механических напряжений; $\mathbf{f}$ — вектор плотности массовых сил; $\mathbf{D}$ — трёхмерный вектор индукции электрического поля; $\mathbf{c}_j^E$ — тензор четвертого ранга упругих модулей, измеренных при постоянном электрическом поле; $\mathbf{e}_j$ — тензор пьезомодулей третьего ранга; $\boldsymbol{\varepsilon}$ — тензор деформаций; $\mathbf{E}$ — трёхмерный вектор напряжённости электрического поля; $\varphi(x,t)$ — функция электрического потенциала; $\boldsymbol{\text{э}}_j^S$ — тензор второго ранга диэлектрических проницаемостей, измеренных при постоянной деформации; $\alpha_{dj}, \beta_{dj}, \varsigma_d$ — неотрицательные коэффициенты демпфирования, а остальные обозначения стандартны для теории электроупругости, за исключением дополнительного индекса *j*, указывающего на принадлежность к среде Ω_j с номером *j*.

Для сред $\Omega_j = \Omega_{em}$ с чисто упругими свойствами будем учитывать только механические поля, для которых примем аналогичные (1)–(3) полевые уравнения и определяющие соотношения в пренебрежении электрическими полями и эффектами пьезоэлектрической связности.

Система дифференциальных уравнений (1)–(3) дополняется механическими и электрическими граничными условиями и среди них отметим условие на электроде S, который связан с электрическим устройством накопления энергии.

$$\int_S \dot{D}_n\,ds = I\,, \tag{4}$$

где I — ток в цепи, который в случае свободного электрода равен нулю.

2. Конечноэлементное моделирование. В конечноэлементном пакете ANSYS осуществлено построение модели пьезоэлектрического устройства накопления энергии на основе кантеливера с подложкой, выполненной из стеклопластика (дюраль или сталь) размером $L\times B\times H$. Геометрические размеры приведены на рис. 1. Пьезоэлементы (ПЭ) состоят из двух одинаковых пьезопластин, поляризованных по толщине, имеют соответствующие размеры $L_p\times B_p\times H_p$.

В настоящей работе рассматривается пьезоэлектрическое устройство накопления энергии для двух моделей с разными условиями закрепления и механического воздействия.

Первая модель (рис. 1, *б*) совершает малые колебания в подвижной системе координат, связанной с поверхностью, к которой прикрепляется левая сторона пластины. Вертикальные колебания подвижной системы определяются соотношением:

$$y = y_0 \cdot \exp\left(-i \cdot \left(2\pi f\right) \cdot t\right), \quad (5)$$

где y_0 — амплитудное колебание (y_0 = 0,1 мм), f — частота вынужденных колебаний.

Во второй модели основание устройства может свободно перемещаться по вертикали и закреплено в горизонтальном направлении (рис. 1, *в*). Колебания вызываются действием силы F:

$$F = F_0 \cdot \exp\left(-i \cdot \left(2\pi f\right) \cdot t\right), \quad (6)$$

где F_0 — амплитудная внешняя сила (F_0 = 1 Н), f — частота вынужденных колебаний.

На размеры конструкции (рис. 1) приняты следующие ограничения: размеры пластины $L \times B$ = 110×10 мм; толщина пластины H изменяется в пределах 0,05÷2 мм; пьезоэлементы имеют размеры $L_p \times B_p \times H_p$ = 54×6×0,5 мм; величины L_m и B_m постоянны и равны L_m = 8 мм; B_m = 22 мм; значения $L_1 = L_2$ = 1 мм.

Ниже приводятся константы материалов, используемые в расчетах: пьезоэлемент 1 — пьезокерамика ПКР-7М; подложка 2 — стеклопластик, дюраль, сталь; инерционный элемент 3 — алюминий.

Таблица 1

Материальные константы пьезокерамики ПКР-7М

C_{11}^E, ГПа	C_{12}^E, ГПа	C_{13}^E, ГПа	C_{33}^E, ГПа	C_{44}^E, ГПа	e_{31}, Кл/м^2	e_{33}, Кл/м^2	e_{15}, Кл/м^2	$\varepsilon_{11}/\varepsilon_0$	$\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$
109	67	64	97	23	−13,1	27,1	20,1	1990	1740

$\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м, плотность $\rho = 8,0 \times 10^3$ кг/м^3, добротность Q = 10.

Упругие свойства изотропных материалов задаются с помощью модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν.

Рассматривается преобразователь с подложкой из различных материалов: дюраль, сталь и стеклопластик. Значение плотности дюраля выше значения плотности стеклопластики, но ниже значения плотности стали.

Таблица 2

Характеристики конструкционных материалов

	Стеклопластик	**Дюраль**	**Сталь**	**Алюминий**
Плотность, ρ (кг/м^3)	2500	2700	7800	2700
Модуль Юнга, E (ГПа)	70	74	210	68
Коэффициент Пуассона, ν	0,25	0,34	0,3	0,36

В данной работе для двух моделей, исследуются значения собственной резонансной частоты f_r и амплитудные значения электрического потенциала V на верхнем свободном электроде, в зависимости от материала и значения толщина подложки h при отсутствии и наличии инерционной массы, а также в зависимости от ее значения M.

3. Результаты численных расчётов.

3.1. Значения толщины подложки *h* изменяются в пределах 0,05 ÷ 2 мм, без инерционной массы. В этом случае (инерционная масса отсутствует) на рис. 2 представлены результаты зависимости значений собственной частоты f_r и амплитудные значения электрического потенциала V на верхнем свободном электроде при колебаниях на резонансных частотах от материала и значения толщины подложки h, изменяющейся в интервале 0,05 ÷ 2 мм.

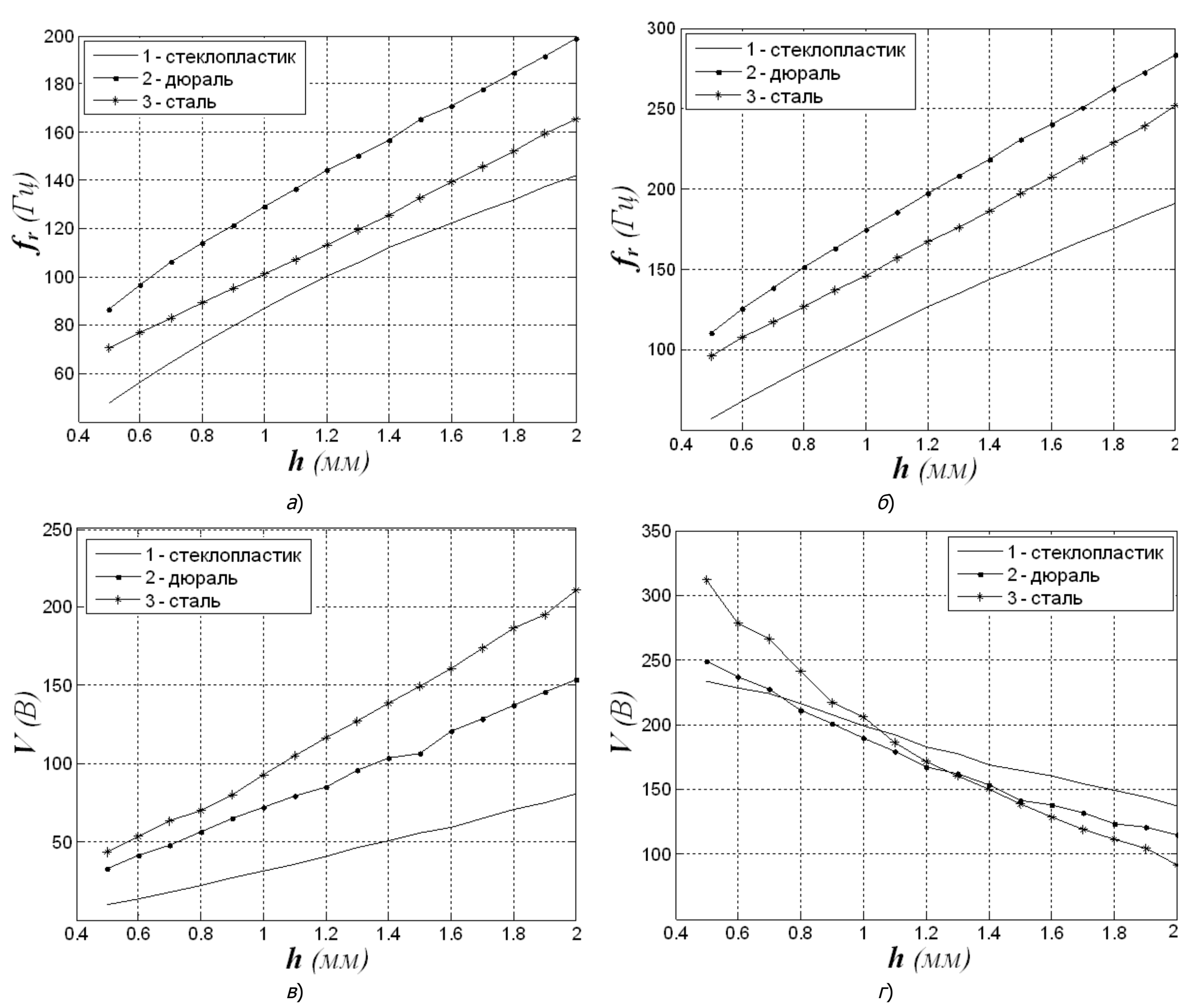


Рис. 2. Зависимости собственной частоты от материала и значения толщина подложки *h* без инерционной массы: *а*, *в* — для первой модели; *б*, *г* — для второй модели. 1 — стеклопластик; 2 — дюраль; 3 — сталь

На рис. 2, *а*, *б* представлены зависимости собственной частоты от материала и значения толщина подложки *h.*

Из рис. 2, *а*, *б* видно, что для обеих моделей, значения собственной частоты возрастает с ростом толщины. Значения собственной частоты для первой модели меньше (рис. 2, *а*), чем для второй модели (рис. 2, *б*). При этом собственные частоты при материале подложки — сталь выше частот для подложки из стеклопластика, но ниже частот для подложки из дюраля.

На рис. 2, *в*, *г* представлены зависимости амплитудных значений электрического потенциала на верхнем свободном электроде от материала и значения толщина подложки *h*, при колебании на первой собственной частоте.

Из рис. 2, *в* видно, что для первой модели значение электрического потенциала на верхнем свободном электроде возрастает с ростом толщины *h*. И наоборот, из рис. 2, *г* видно, для второй модели значение электрического потенциала на верхнем свободном электроде убывает с ростом толщины подложки *h*.

3.2. Значения толщины подложки *h* изменяются в пределах 0,05 ÷ 2 мм и инерционная масса равна 5 г. В этом случае на рис. 3 представлены результаты зависимости значения собственной частоты и амплитудные значения электрического потенциала на верхнем свободном

электроде при колебаниях на резонансных частотах от материала и значения толщины подложки *h*, изменяющейся в интервале 0,05 ÷ 2 мм.

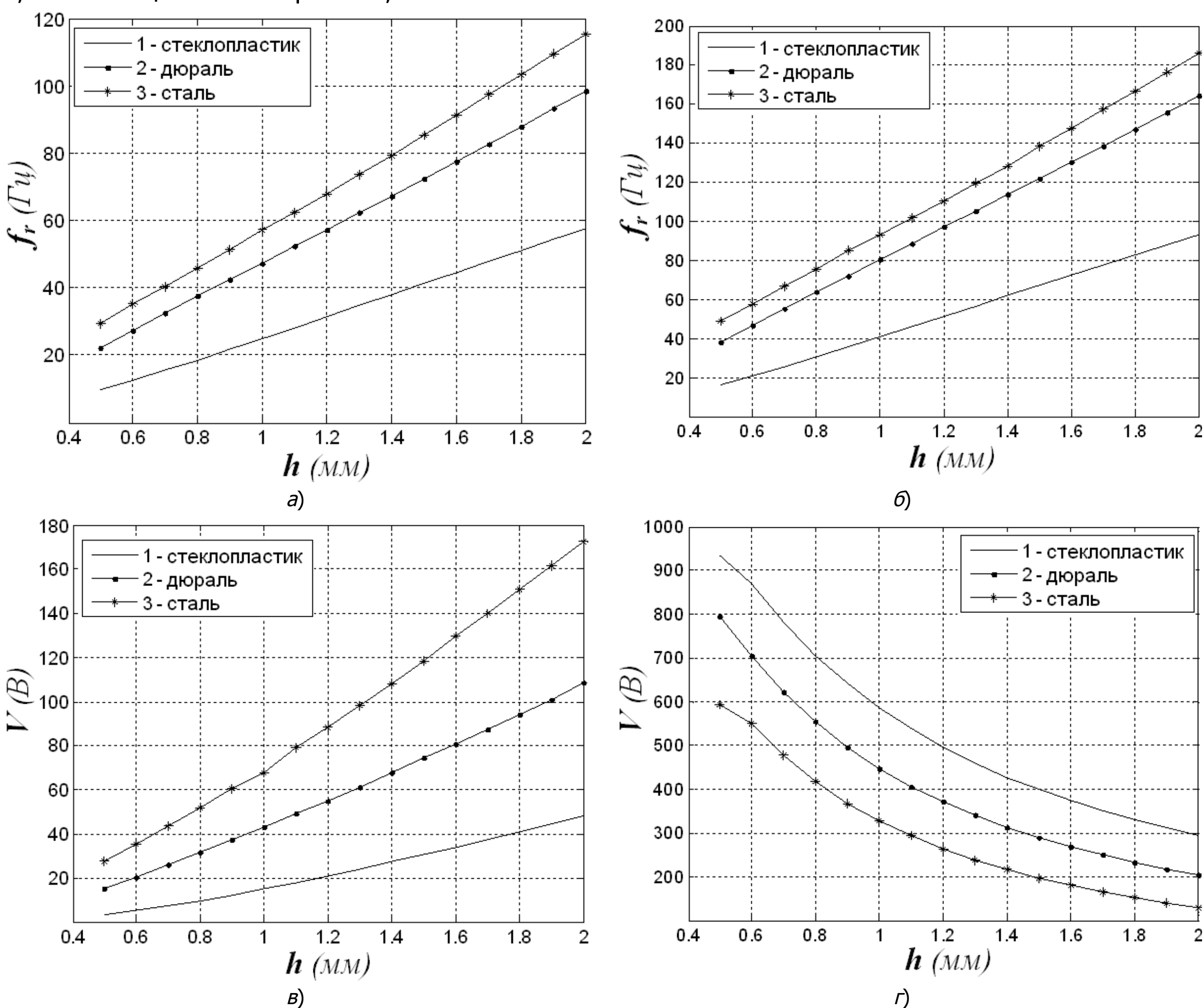


Рис. 3. Зависимости собственной частоты от материала и значения толщина подложки *h*, инерционная масса равна 5 г: *а*, *в* — для первой модели; *б*, *г* — для второй модели. 1 — стеклопластик; 2 — дюраль; 3 — сталь

На рис. 3, *а*, *б* представлены зависимости собственной частоты от материала и значения толщины подложки *h.*

Из рис. 3, *а*, *б* видно, что для обеих моделей, значения собственной частоты возрастает с ростом толщины. Значение собственной частоты для первой модели (рис. 3, *а*) меньше, чем для второй модели (рис. 3, *б*). При этом собственные частоты при материале подложки — дюраль выше частот для подложки из стеклопластика, но ниже частот для подложки из стали.

На рис. 3, *в*, *г* представлены зависимости амплитудных значений электрического потенциала на верхнем свободном электроде от материала и значения толщина подложки *h*, при частоте колебаний равной значению первой собственной частоте устройств.

Из рис. 3, *в* видно, что в первой модели, значение электрического потенциала на верхнем свободном электроде возрастает с ростом толщины *h*. Наоборот, из рис. 3, *г* видно, что во второй модели, значение электрического потенциала на верхнем свободном электроде убывает с ростом толщины *h*.

3.3. Значения инерционной массы *M* изменяются в пределах 0 ÷ 15 г и толщина подложки *h* равна 1,2 мм. В этом случае результаты зависимости значения собственной частоты и

амплитудные значения электрического потенциала на верхнем свободном электроде при колебаниях на резонансных частотах от материала и значения массы инерционного элемента *М*, изменяющейся в интервале 0 ÷ 15 г, представлены на рис. 4.

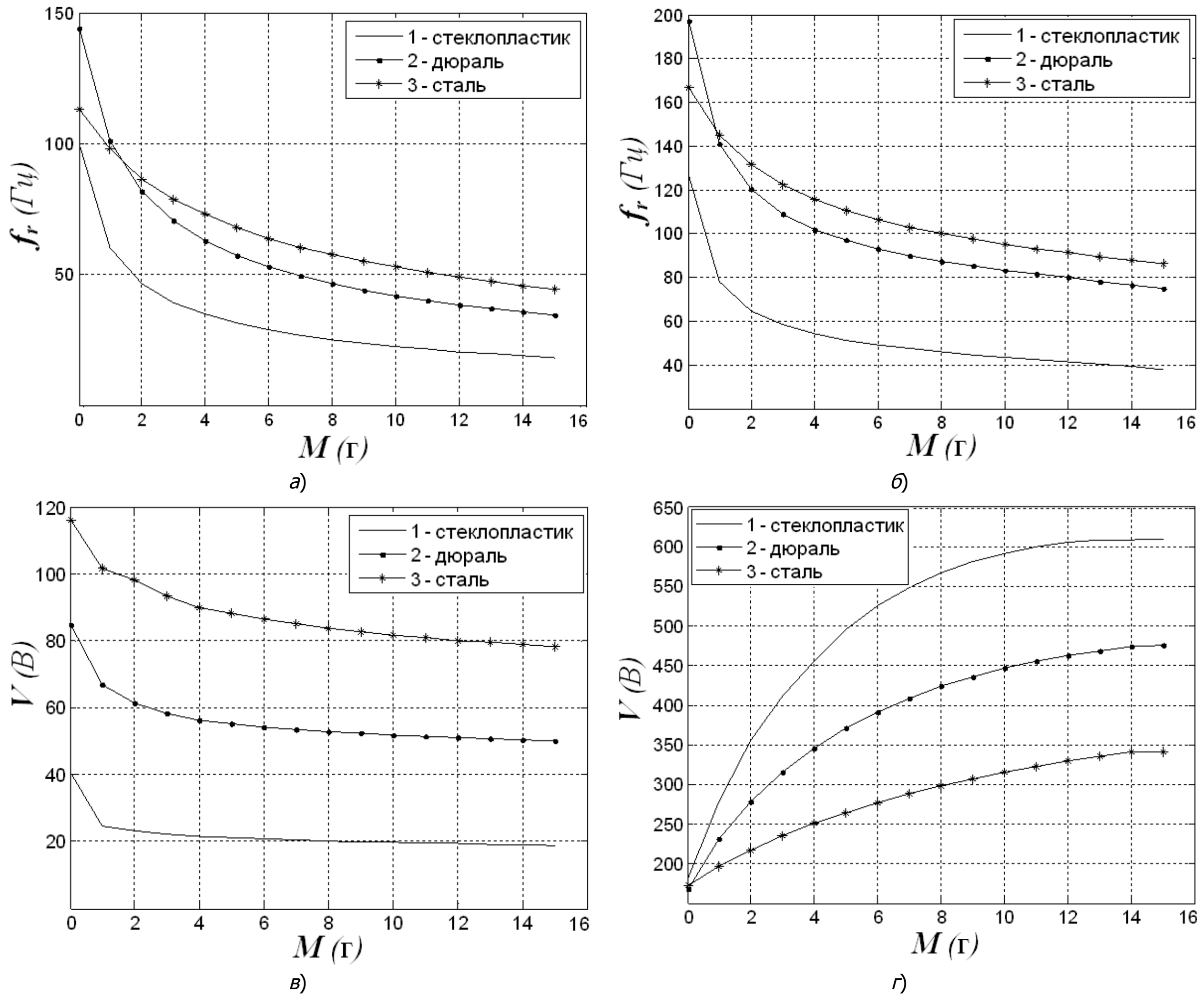


Рис. 4. Зависимости собственной частоты от материала и значения массы инерционного элемента *М*, *h* = 1,2 мм: *а*, *в* — для первой модели; *б*, *г* — для второй модели; 1 — стеклопластик; 2 — дюраль; 3 — сталь

На рис. 4, *а*, *б* представлены зависимости собственной частоты от материала и значения массы инерционного элемента *М*.

Из рис. 4, *а*, *б* видно, что для двух случаев, значение собственной частоты убывает с ростом толщины. Значение собственной частоты для первой модели меньше (рис. 4, *а*), чем для второй (рис. 4, *б*).

На рис. 4, *в*, *г* для первой и второй моделей соответственно представлены зависимости амплитудных значений электрического потенциала на верхнем свободном электроде от материала и значения массы инерционного элемента *М* при колебаниях на первой собственной частоте устройств.

Из рис. 4, *в* видно, что в первой модели значение электрического потенциала на верхнем свободном электроде убывает с ростом массы инерционного элемента *М*. И наоборот, из рис. 4, *г* видно, что во второй модели значение электрического потенциала на верхнем свободном электроде возрастает с ростом массы инерционного элемента *М*.

3.4. Значения электрического потенциала на верхнем свободном электроде при колебаниях на нерезонансной частоте 10 Гц. В этом случае рассматривается задача возбуждения колебаний на нерезонансной частоте 10 Гц. При этом значения электрического потенциала на верхнем свободном электроде, в зависимости от материала и значения толщины подложки *h*, при отсутствии и наличии инерционной массы, а также в зависимости от её значения *M* представлены на рис. 5.

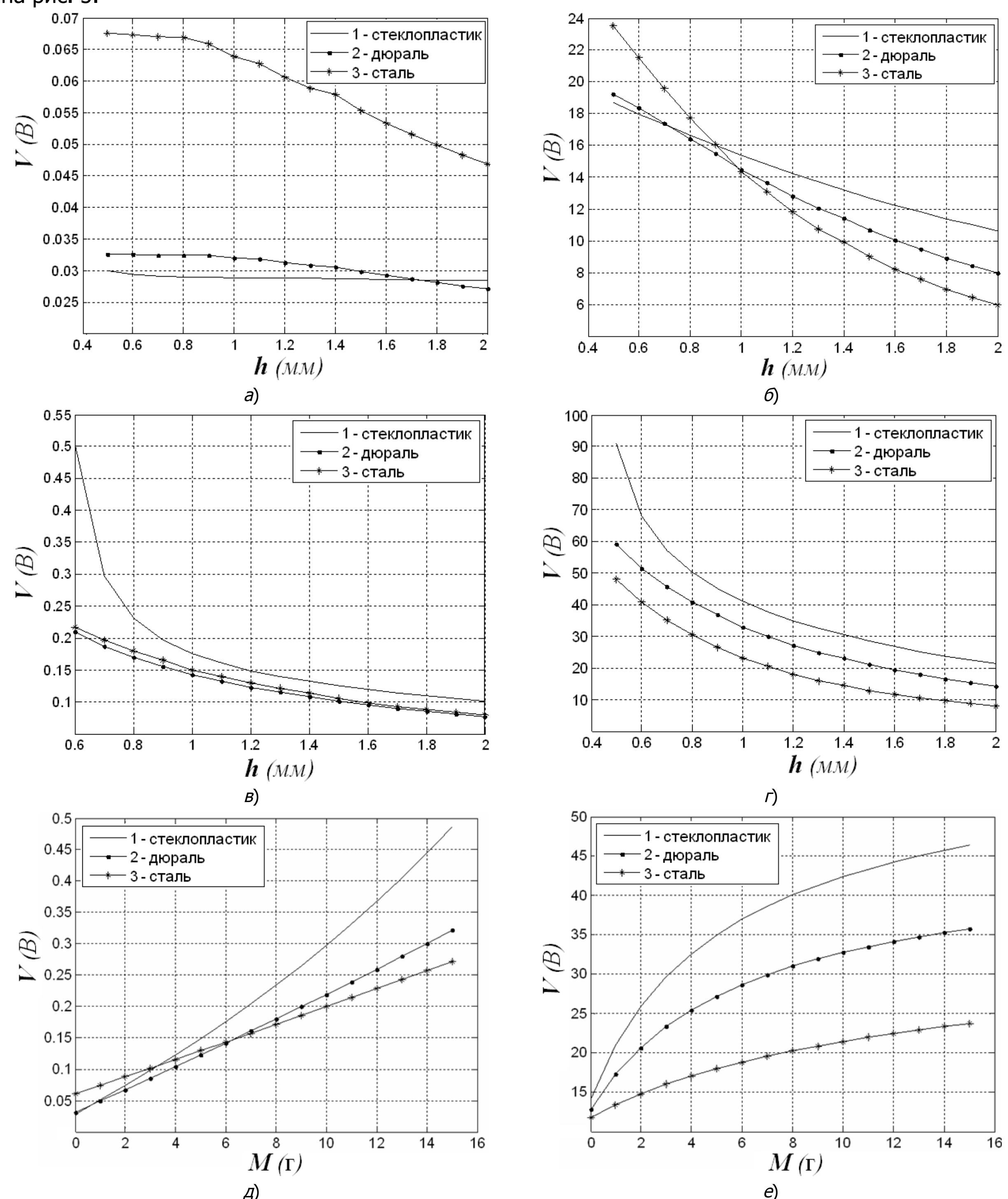


Рис. 5. Зависимости амплитудных значений электрического потенциала на верхнем свободном электроде от материала и значения толщины подложки *h*: *а*, *в*, *д* — для первой модели; *б*, *г*, *е* — для второй модели: 1 — стеклопластик; 2 — дюраль; 3 — сталь

На рис. 5, *а*, *б*, *в* и *г* представлены зависимости амплитудных значений электрического потенциала на верхнем свободном электроде от материала и значения толщины подложки *h*, при колебаниях на нерезонансной частоте 10 Гц. Рис. 5, *а*, *б* описывают случай, когда инерционная масса отсутствует, а на рис. 5, *в*, *г* представлены результаты для инерционной массы равной 5 г. На рис. 5, *д*, *е* представлены зависимости амплитудных значений электрического потенциала на верхнем свободном электроде при нерезонансной частоте колебаний 10 Гц от значения массы инерционного элемента *М*, изменяющейся в интервале 0 ÷ 15 г в случаях, когда толщина подложки *h* равна 1,2 мм.

Из рис. 5 видно, что для двух моделей значение электрического потенциала на верхнем свободном электроде, при котором значение частоты колебаний равно 10 Гц убывает с ростом толщины *h* (рис. 5, *а*, *б*, *в* и *г*) и возрастает с ростом значения массы инерционного элемента *М* (рис. 5, *д*, *е*).

Заключение. В работе рассматривается трехмерная конечноэлементная модель в пакете ANSYS устройства накопления энергии на основе кантеливера для двух способов возбуждения колебаний: в первом осуществляется кинематическое воздействие, во втором — силовое. Активным элементом устройства накопления энергии является пьезоэлектрическая керамика. Исследована эффективность устройства в зависимости от его геометрических характеристик и материалов в условиях некоторых ограничений на размеры устройства. Проведённые в работе расчёты позволяют выбрать рациональные размеры элементов и материалы для достижения наибольшей эффективности устройства. При этом проанализированы два случая. В первом — устройство накопления энергии работает на первой собственной частоте изгибных колебаний, а во втором — частота колебаний фиксирована и достаточно мала. В обоих случаях в работе сформулированы рекомендации конструктору для выбора материала подложки, её толщины и массы инерционного элемента. Построенные зависимости позволяют сконструировать устройство с заданной частотой собственных колебаний, которая в реальных условиях может определяться внешним воздействием.

Библиографический список

1. Priya, S. Energy harvesting technologies / S. Priya, D. J. Inman // Springer Science+Business Media, LLC. — 2009. — 522 p.

2. Erturk, A. Piezoelectric energy harvesting / A. Erturk, D. J. Inman // John Wiley & Sons, Ltd. — 2011. — 402 p.

3. Minazara, E. Piezoelectric Generator Harvesting Bike Vibrations Energy to Supply Portable Devices / E. Minazara, D. Vasic, F. Costa // In Proceedings of ICREPQ, 12–14 March 2008, Santander, Spain. — 6 p.

4. Glynne-Jones, P. An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems / P. Glynne-Jones, M. J. Tudor, S. P. Beeby, N. M. White // Sens. Actuators A Phys. — 2004. — Vol. 110. — № 1. — Pp. 344–349.

5. Mitcheson, P. D. MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation / P. D. Mitcheson, P. Miao, B. H. Stark, E. M. Yeatman, A. S. Holmes, T. C. Green // Sens. Actuators A Phys. — 2004. — Vol. 115. — № 2. — Pp. 523–539.

6. Sodano, H. A. A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials / H. A. Sodano, G. Park, D. J. Inman // Shock Vib. Digest. — 2004. — Vol. 36. — № 3. — Pp. 197–205.

7. Anton, S. R. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006) / S. R. Anton, H. A. Sodano // Smart Mater. Struct. — 2007. — Vol. 16. — № 3. — Pp. 1–21.

8. Erturk, A. A. Distributed Parameter Electromechanical Model for Cantilevered Piezoelectric Energy Harvesters / A. Erturk, D. J. Inman // Journal of Vibration and Acoustics. — 2008. — Vol. 130. — № 4. — Pp. 041002-1 — 041002-15.

9. Dutoit, N. E. Design considerations for MEMS-scale piezoelectric mechanical vibration energy harvesters / N. E. Dutoit, B. L. Wardle, S. G. Kim // Integr. Ferroelectr. — 2005. — Vol. 71. — № 1. — Pp. 121–160.

10. Sodano, H. A. Estimation of Electric Charge Output for Piezoelectric Energy Harvesting / H. A. Sodano, G. Park, D. J. Inman // Journal of Strain. — 2004. — Vol. 40. — Pp. 49–58.

11. Erturk, A. Analytical Modeling of Cantilevered Piezoelectric Energy Harvesters for Transverse and Longitudinal Base Motions / A. Erturk, D. J. Inman // In Proceedings of Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Schaumburg, Illinois. 7–10 April 2008. — 36 p.

12. Liao, Y. Model of a Single Mode Energy Harvester and Properties for Optimal Power Generation / Y. Liao, A. H. Sodano // Smart Materials and Structures. — 2008. — Vol. 17. — 065026 (14 Pp).

13. Белоконь, А. В. Новые схемы конечно-элементного динамического анализа пьезоэлектрических устройств / А. В. Белоконь, А. В. Наседкин, А. Н. Соловьев // Прикладная математика и механика. — 2002. — Т. 66, № 3. — С. 491–501.

Материал поступил в редакцию 08.11.2013.

References

1. Priya, S., Inman, D. J. Energy harvesting technologies. Springer Science+Business Media, LLC, 2009, 522 p.

2. Erturk, A., Inman, D. J. Piezoelectric energy harvesting. John Wiley & Sons, Ltd., 2011, 402 p.

3. Minazara, E., Vasic, D., Costa, D. F. Piezoelectric Generator Harvesting Bike Vibrations Energy to Supply Portable Devices. In Proc.s of ICREPQ, 12–14 March 2008, Santander, Spain, 6 p.

4. Glynne-Jones, P., Tudor, M. J., Beeby, S. P., White, N. M. An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems. Sens. Actuators A Phys., 2004, vol. 110, no. 1, pp. 344–349.

5. Mitcheson, P. D., Miao, P., Stark, B. H., Yeatman, E. M., Holmes, A. S., Gree, T. C. MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation. Sens. Actuators A Phys., 2004, vol. 115, no. 2, pp. 523–539.

6. Sodano, H. A., Park, G., Inman, D. J. A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials. Shock Vib. Digest, 2004, vol. 36, no. 3, pp. 197–205.

7. Anton, S. R., Sodano, H. A. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006). Smart Mater. Struct., 2007, vol. 16, no. 3, pp. 1–21.

8. Erturk, A. A., Inman, D. J. Distributed Parameter Electromechanical Model for Cantilevered Piezoelectric Energy Harvesters. Journal of Vibration and Acoustics, 2008, vol. 130, no. 4, pp. 041002-1 — 041002-15.

9. Dutoit, N. E., Wardle, B. L., Kim, S. G. Design considerations for MEMS-scale piezoelectric mechanical vibration energy harvesters. Integr. Ferroelectr., 2005, vol. 71, no. 1, pp. 121–160.

10. Sodano, H. A., Park, G., Inman, D. J. Estimation of Electric Charge Output for Piezoelectric Energy Harvesting. Journal of Strain, 2004, vol. 40, pp. 49–58.

11. Erturk, A., Inman, D. J. Analytical Modeling of Cantilevered Piezoelectric Energy Harvesters for Transverse and Longitudinal Base Motions. In Proceedings of Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Schaumburg, Illinois, 7–10 April 2008, 36 p.

12. Liao, Y., Sodano, H. A. Model of a Single Mode Energy Harvester and Properties for Optimal Power Generation. Smart Materials and Structures, 2008, vol. 17, 065026 (14p).

13. Belokon, A. V., Nasedkin, A. V., Solovyev, A. N. Novyye shemy konechno-elementnogo dinamicheskogo analiza pyezoelektricheskikh ustroystv. [New schemes of finite element dynamic analy-

sis of piezoelectric devices.] Prikladnaya matematika i mekhanika, 2002, vol. 66, no. 3, pp. 491–501 (in Russian).

FINITE-ELEMENT MODELLING OF PIEZOELECTRIC ENERGY STORAGE DEVICE BASED ON CANTILEVER*

A. N. Solovyev, Le Van Duong

Simulating a piezoelectric generator which is an element of the energy storage device is considered. A piezoelectric generator appears a cantilever-mounted plate on which the piezoelectric elements are glued, and the inertial mass is attached. Two options of the plate vibration excitation are investigated. In the first case, the fixed side executes heave harmonic motions at a given frequency and with the desired amplitude; in the second — a harmonic force is applied to this side. A three-dimensional boundary-value problem of the linear theory of electroelasticity for the composite elastic and piezoelectric body is considered as a mathematical model of the device. The boundary problem is solved through the finite-element package ANSYS. Under the numerical solution, PKR-7M piezoceramic is taken as a piezoelectric material, whereas fiberglass, duralumin, steel are considered as a plate material. Aluminum is used as a material of the inertial mass. Two cases are studied computationally. In the first case, the fixed side executes vertical harmonic vibrations at a given frequency and with a preset amplitude, in the second case, the force varying in a harmonic fashion is applied to this side. The device resonance frequency dependence upon the plate thickness for various materials and upon the value of the inertial element mass is studied. The results are presented graphically that allows finding the resonant frequency for certain sizes. The output potential dependences at the free electrodes of the piezoelectric elements on the resonant frequencies and in the low-frequency region on the same parameters are investigated. These results are also presented graphically that allows a designer to select reasonable feature sizes and the mix of materials to optimize the device.

Keywords: *FEM, energy storage, piezoelectric, optimization, cantilever.*

* The research is done with the financial support from RFFI (Grants nos. 13-01-00196-a, 13-01-00943-a).